

Physique 1

Présentation du sujet

L'épreuve porte sur une étude du champ magnétique terrestre et de son origine. Elle comporte trois parties très largement indépendantes, à l'exception notable du nombre de Reynolds magnétique rencontré à plusieurs reprises dans les deux dernières parties.

La première partie étudie une expérience classique de mesure du champ magnétique terrestre réalisable en travaux pratiques. Une analyse qualitative, notamment en exploitant des raisonnements graphiques, du champ magnétique produit par des bobines de Helmholtz est conduite. Elle se poursuit par l'étude du comportement mécanique d'une boussole dans ce champ combiné à celui de la Terre, permettant une mesure précise de la valeur du champ magnétique terrestre.

La seconde partie, représentant la moitié du sujet, étudie l'effet dynamo à la fois de manière qualitative et quantitative. La compréhension de ce phénomène s'appuie sur la notion de dipôle magnétique et sur les lois de l'induction, où en particulier le rôle du champ électromoteur est introduit de manière simplifiée. L'étude du comportement de différents systèmes amène alors à définir un nombre sans dimension dont la valeur critique expliquerait la création spontanée d'un champ magnétique.

La dernière partie établit quelques relations simplifiées de la magnétohydrodynamique, domaine d'étude des champs électromagnétiques dans un fluide en mouvement, à l'origine des modèles permettant d'expliquer l'existence du champ magnétique terrestre. Cette étude s'appuie sur les outils de l'analyse vectorielle, et l'évaluation d'ordres de grandeur, aboutissant au même nombre sans dimension rencontré à la partie précédente, le nombre de Reynolds magnétique.

Dans la continuité des changements de programme et suite à l'introduction de nouvelles typologies d'épreuve l'année passée, ce sujet s'appuie sur deux documents dont un article complet paru en 2007 dans la revue de la Société Physique de France, permettant de développer un nombre conséquent de questions d'analyse documentaire.

Analyse globale des résultats

Le sujet est de longueur raisonnable : quelques rares candidats ont abordé la totalité des questions et une grande partie des questions a dans l'ensemble été abordée par la majorité des candidats.

Les questions posées sont en grande majorité de difficulté raisonnable, bien que certaines abordent des objets ou des notions plus complexes. Cela a permis de bien classer les candidats. Les candidats armés d'une bonne connaissance du cours, d'une bonne maîtrise des méthodes habituelles, ont pu valoriser leurs qualités, sous réserve d'une rédaction satisfaisante.

Le sujet propose trois questions en relation avec l'analyse de deux documents de difficultés graduelles. Parmi les candidats ayant abordé ces questions, trop nombreux sont ceux qui se contentent de recopier le premier argument fourni dans le texte, sans le mettre en contexte, voire sans même répondre à la question posée dans l'énoncé. Ce type d'évaluation se montre très sélectif : il n'y a qu'une très faible corrélation (0,35) entre la note totale et la note à ces questions.

La partie I est assez proche du cours et les candidats ont eu une réussite globale assez satisfaisante. La partie II.A combine une analyse documentaire assez bien réussie, une question de cours et une question ouverte plus difficile. La partie II.B aborde le champ électromoteur ; les résultats

sont donnés, tous les candidats ont abordé ces questions, mais les justifications n'ont jamais été réellement satisfaisantes. La partie II.C est beaucoup plus classique, mais demande un peu de recul sur l'induction. La partie II.D d'analyse documentaire a été moins abordée, elle se situe en fin d'une partie plus longue et difficile que les autres. Elle est pourtant tout à fait accessible. Enfin, la partie III, plus théorique, a été abordée de manière satisfaisante, mais souvent trop superficiellement.

En moyenne, les candidats ont obtenu 31% de leurs points dans la partie I qui représentait 20% des points du barème, 49% dans la partie II (57% du barème) et 20% dans la partie III (23% du barème).

La présentation des copies est globalement satisfaisante, même si un nombre minime de copies s'est vu sanctionné en raison d'une présentation grandement déficiente.

Commentaires sur les réponses apportées et conseils aux futurs candidats

Cette année, du fait de la complexité de certaines notions, de nombreux résultats intermédiaires sont donnés dans l'énoncé. Le jury rappelle aux candidats que toute tentative malhonnête pour arriver au résultat attendu est fortement pénalisée. Toute tentative approximative d'y arriver ne rapporte également aucun point. Sont attendus plus particulièrement dans ce type de questions des justifications valides, étayées, et une méthode irréprochable. Ce sont bien les qualités de la rédaction et de l'argumentation qui sont évaluées, et non le résultat.

Les trois questions **II.A.1)**, **II.D.1)** et **II.D.2)** en relation à l'analyse des deux documents représentent 12% du barème, ce qui indique que l'on pouvait raisonnablement y consacrer au total 30 minutes. Sur ce type de questions, le jury valorise une réelle réflexion appuyée par une rédaction de qualité, scientifiquement valide, ne tolérant pas d'implicites. Trop nombreux sont les candidats qui se contentent de recopier le premier argument fourni dans le texte, sans le mettre en contexte ou le citer explicitement, voire sans même conclure explicitement à la question posée dans l'énoncé. Si ces éléments sont absents, aucun point n'est donné. En sciences, les arguments « presque » bons sont considérés faux. Il s'agit de mettre en avant des liens logiques clairs et explicites.

Dans la continuité des années précédentes le jury a été particulièrement attentif à la validité scientifique des justifications données et à la qualité de la rédaction.

I Une mesure du champ géomagnétique

I.A – La majorité des schémas à trois dimensions des candidats manquent de précision, il aurait pu être utile de distinguer l'avant de l'arrière. Le jury a noté beaucoup de confusions entre le sens conventionnel du courant et son signe pour justifier l'orientation du champ magnétique, en fonction de l'expression fournie. Ainsi la règle « de la main droite » ou du « bonhomme d'Ampère » est généralement mal utilisée.

I.C.1) Beaucoup de candidats intuitent que le champ est uniforme du fait du passage d'un maximum en $x = 0$ à un minimum en fonction de la valeur de e (mais ils n'arrivent généralement pas à faire le lien avec la question suivante...). L'énoncé demandait un intérêt pratique à cette configuration. En quoi le fait d'avoir un champ constant est pratique ? Si l'on souhaite uniquement avoir un champ constant, autant prendre un solénoïde, ce serait même plus facile à régler. Le jury attendait donc des arguments autour de l'espace accessible entre les bobines (2% des candidats) pour réaliser des expériences, comme celle qui était présentée en fin de partie.

I.C.2) La notion de point d'inflexion n'est pas du tout maîtrisée par les candidats (6%). De plus, l'énoncé attend explicitement un raisonnement graphique (il est donc inutile de se lancer dans des calculs, qui ont toujours été faux), qui est beaucoup trop rare. La majorité des candidats comprend

« constant à l'ordre 3 » en arrêtant le raisonnement à l'ordre deux : le fait que pour une fonction paire les dérivées impaires sont toutes nulles en 0 n'est pas du tout connu des candidats (2%).

I.D – De graves confusions entre équilibre et stabilité, seuls 10% des candidats effectuent une démonstration complète.

I.E – Les candidats, quand ils abordent cette question (50%), font preuve d'une très mauvaise méthode pour appliquer correctement un théorème du moment cinétique : pas de mention du référentiel, voire de système (mentionné sur uniquement 15% des copies), aucune analyse sur le poids (au mieux il est « négligeable »), ou sur la liaison (5% des copies).

I.F – Très peu de candidats effectuent une analyse du signe du champ, au cas où il y aurait une inversion de celui-ci (3%).

II Nécessité d'un mécanisme d'entretien du champ géomagnétique : l'effet dynamo

II.A – Limites des explications historiques

II.A.1) L'analyse documentaire est comprise mais la restitution est bien souvent insatisfaisante (42% de réussite). Ce qui pêche est la non-exhaustivité des réponses apportées et plus encore, la non-construction d'un raisonnement scientifique rigoureux. Les rédactions rencontrées dans la moitié des copies sont « Il n'y a pas de super aimant au centre de la Terre car le noyau est à une température supérieure à la température de Curie » ou « Il n'y a pas de super aimant au centre de la Terre car il y a eu des inversions de polarité ». Ces rédactions sont grandement incomplètes et ne rapporte que la moitié des points. Le jury attend une rédaction explicite, de citer le document, d'effectuer des liens logiques explicites, ce qui n'est réalisé correctement que dans 8% des copies.

II.A.2a) Question de cours. Le sujet ne demandait pas la démonstration et trop peu de candidats connaissent leur cours de manière totalement satisfaisante. L'entité attendue par le jury est celle au programme, c'est-à-dire la mention de l'électron en orbite autour du noyau (28%). Quant aux liens entre le moment cinétique et le moment magnétique, le jury attendait la mention et la définition du rapport gyromagnétique (20%), ainsi que sa valeur dans le modèle classique, ou la mention du magnéton de Bohr (18%), dont la signification est très floue par les candidats, souvent confondu avec le rapport gyromagnétique. La valeur du rapport gyromagnétique de l'électron atomique est bien souvent positive même lorsqu'une tentative de démonstration est développée.

II.A.2b) Cette question plus difficile a rarement été abordée. Il est à noter une solution élégante et au programme, proposée par de trop rares candidats, en passant par le rapport gyromagnétique puisque le moment d'inertie de la boule était donné dans l'énoncé. Le jury avait prévu dans son barème des solutions par des méthodes d'analyse dimensionnelle, mais cela n'a quasiment jamais été proposé par les candidats.

II.A.2c) De nombreuses confusions avec la répartition de masse dans la Terre, qui était donnée en annexe, et la répartition d'électrons auquel le modèle faisait référence. Il existait de nombreux arguments, donnés dans les annexes, permettant de réfuter l'hypothèse de l'énoncé.

II.B – L'effet dynamo

II.B.1) Les résultats étaient donnés ; tous les candidats les ont retrouvés, plus ou moins approximativement, mais n'ont pas forcément eu les points, ceux-ci ayant été attribués aux justifications sérieuses et correctes : définition claire du système sur lequel appliquer la force de Lorentz (3%) (il est à noter qu'une particule de fluide ne possède pas une charge q mais δq , un fluide est un milieu continu), formule de changement de référentiel pour la vitesse d'un point (5%), définition explicite du courant volumique en distinguant les porteurs de charge (3%).

II.B.1b) Pour 70% des candidats, ce résultat est une question de cours ne nécessitant que la réponse « Le fluide n'est pas chargé donc $\vec{j} = \vec{j}'$ ». Pour la plupart des autres candidats, la tentative de démonstration se base sur la confusion grave entre la charge volumique totale et celles impliquées dans les courants volumiques : $\vec{j} = \rho\vec{v} = \vec{0}$ car le fluide n'est pas chargé donc $\vec{j} = \vec{j}'$. Le jury insiste encore une fois sur le fait que ce sont les justifications qui sont valorisées, et non les tentatives futiles et désespérées de tomber miraculeusement sur le résultat donné dans l'énoncé.

II.B.2a) Beaucoup trop de candidats invoquent l'équation de Maxwell Faraday pour expliquer ce résultat (pour lesquels donc « induction = Maxwell Faraday »). C'est ne pas avoir fondamentalement compris (indépendamment de la compréhension d'un champ électromoteur) que dans les équations de Maxwell, les sources sont les membres de droite, et les conséquences de ces sources les membres de gauche (au même titre que dans un PFD, la force est à l'origine d'une accélération...). Or c'est ceci qui a été évalué : seuls 13% des candidats sont capables de faire référence à l'équation de Maxwell Ampère pour expliquer le fait qu'un *courant* d'induction est responsable d'un champ magnétique.

II.B.2c) La réponse à cette question pouvait se comprendre grâce à la lecture des articles. Mais le jury a attendu la caractéristique de r_m dans le contexte de la question, c'est-à-dire un coefficient qui mesure l'efficacité du processus d'induction.

Le jury déplore fortement la présence unique de *paraphrases* pour commenter l'influence de σ , cette question ayant été abordée par presque tous les candidats. Trop peu de candidats font l'effort d'expliquer *pourquoi* r_m est croissant avec σ , en mentionnant le terme d'« induction » (10%).

II.C – Étude d'une dynamo à courant et mouvement contraints : la dynamo de Bullard

II.C.1) Beaucoup de candidats, pour répondre à la question de la direction du champ, font référence à une base de projection qui n'était pas donnée dans le texte, sans la définir, ne serait-ce que par un schéma, ou en la définissant dans le vide. Le jury insiste sur le fait qu'il est important de définir ses notations, sans quoi le raisonnement des candidats ne peut être comptabilisé.

II.C.2) Le jury a attendu dans cette question des liens explicites entre les limites géométriques et les dépendances du champ, un « $d \ll a \ll b$ donc (résultat donné) » ne donnait aucun point, et cela a été très mal réalisé par les candidats. On pouvait apporter une réponse de plusieurs manières différentes, et on peut aussi noter que l'hypothèse $a \ll b$ suffit pour démontrer le résultat. Le jury insiste encore une fois sur le fait que ce sont les justifications qui sont évaluées.

II.C.3) Le jury attendait notamment sur cette question ou sur la question **II.C.5)** une justification explicite de l'équation électrique (schéma et mention de la loi des mailles ou équivalent, 27%).

II.C.4) Question qui demandait d'avoir compris le sujet, et le jury attendait uniquement pour justification « par analogie ».

II.C.6) En lisant la suite du sujet, on pouvait avoir la réponse à cette question, qui demande encore une fois un peu de recul sur l'induction. Mais seuls 10% des candidats ont mentionné un effet valide en lien avec l'équation mécanique.

II.C.7) Question plus difficile, dont le résultat était donné. Toute tentative malhonnête de tomber sur le résultat a été sanctionnée.

II.C.8) Cette question était quasi-donnée, donc presque tous les candidats l'ont abordée. Mais le jury déplore fortement l'oubli par 95% (!) des candidats du \pm sur l'expression du courant lorsqu'elle a été abordée.

II.C.9) Question de cours très mal réalisée (14%). Lorsque les candidats connaissent la méthode d'obtention des bilans énergétiques à partir des équations électriques et mécaniques, ils s'arrêtent

aux deux équations découplées, et ne profitent pas du couplage parfait électromécanique. Les questions sur les significations physiques de termes dans les équations sont comme d'habitude très sélectives, il y a encore beaucoup trop d'imprécisions dans les termes employés (confusions énergie/puissance, reçues, cédées...).

II.D – L'expérience VKS2 (ENS Lyon, Ulm et CEA Saclay, Cadarache)

II.D.1) Question d'analyse documentaire sur l'article de la revue de la SFP, dont la compréhension est plus difficile. Le jury déplore toutefois le peu d'investissement des candidats pour ce type de questions, qui se contentent bien généralement d'un « c'est un bon fluide conducteur », là où l'article cite « c'est le meilleur fluide conducteur autour de $100 - 150\text{ °C}$ », dont la signification est totalement différente (23% de bonnes réponses). De même, 85% des candidats de la filière PC ne connaissent pas les problèmes de réactivité du sodium avec l'eau. Enfin, dans beaucoup de copies, l'article n'est pas compris : la surconsommation électrique ou le caractère turbulent de l'écoulement sont perçus comme dangereux.

II.D.2) Le jury a dénombré au moins cinq caractéristiques mises en valeur par l'expérience et citées par l'article. Les candidats n'ont pas une démarche suffisamment sérieuse : sur les 50% des candidats abordant cette question, 60% d'entre eux se contentent d'une caractéristique, 30% de deux.

II.D.3) La distinction entre viscosité cinématique et dynamique est en général bien exploitée. Cette question a surtout révélé de nombreux problèmes de compréhension de l'article. Une part non négligeable des candidats fait référence à la valeur $10^3 - 10^4$, qui est celle des nombres de Reynolds accessibles en 2007 aux simulations numériques, d'autres confondent avec le Reynolds magnétique. On peut aussi rappeler qu'un nombre de Reynolds ne peut raisonnablement pas être donné avec plus de un chiffre significatif.

II.D.4) Le jury attendait une phrase convaincante faisant référence explicite au texte, ne se contentant évidemment pas de « ça marche ».

III Relations fondamentales de la magnétohydrodynamique

III.A – Le jury rappelle qu'il valorise les bonnes rédactions et les commentaires pertinents. Par exemple à cette question, le jury a valorisé candidats qui ont rappelé le nom des équations de Maxwell, alors que ce n'était pas explicitement demandé par l'énoncé (44%). Le jury déplore toutefois encore de trop nombreux candidats (15%) qui ne savent pas écrire correctement ces équations.

III.B.1) L'énoncé ne précise pas sous quelle forme l'équation finale est attendue, donc les candidats avec peu de recul partent dans tous les sens : quel est l'intérêt pourtant de développer cette équation ? Quel est le sens de cette équation ? Une réponse partielle se situait dans les questions suivantes. Au final, cette question était presque donnée et les candidats l'ont tous abordée, le jury n'a alors sanctionné que les erreurs de calcul, malheureusement rencontrées dans 65% des copies (!).

III.B.2) L'application numérique est réalisée correctement par le plus grand nombre (48%), mais seuls 2% de ces candidats fait une analyse sérieuse du résultat $\tau = 10^{-19}\text{ s}$. Pour une bien trop grande majorité « c'est petit », aucun ne compare ce temps à quoi que ce soit, ou n'en déduit rien.

III.B.3) Question difficile très peu abordée. L'application numérique était pourtant relativement aisée. Pour l'interprétation, encore une fois le jury ne s'est pas contenté d'une paraphrase de l'équation, donc le point n'a quasiment jamais été donné.

III.D – L’identification des deux termes est aisée car quasi donnée par le sujet (une chance sur deux...), le jury a alors évalué des justifications sur ces identifications : présence du laplacien, et présence d’un terme prenant en compte le mouvement du fluide.

III.E – Question difficile très peu abordée, seuls 6% des candidats savent par quoi il faut multiplier un champ magnétique pour tomber sur une énergie volumique. Il est encore une fois regrettable que de nombreux candidats *affirment* que le terme $\Delta \vec{B} \cdot \vec{B}$ est le terme de pertes par effet Joule, poussés par le résultat donné de la question.

III.F – La première partie de question est presque donnée et grapillée par beaucoup de candidats (21%). Il est toutefois regrettable que trop peu de candidats réfléchissent à une condition nécessaire et non uniquement suffisante, dont le catalogue est grandement inutile. Et parmi ces candidats, seuls un tiers connaissent le temps caractéristique diffusif. L’application numérique du temps caractéristique est réalisée correctement seulement par 2% des candidats. Presqu’aucun candidat ne l’interprète correctement (0,5%).

Conclusion

Ce sujet s’appuyant sur des questions de cours, des questions classiques et de manière nouvelle pour cette épreuve sur l’utilisation de documents pour répondre à des questions assez ouvertes a permis de très bien classer les candidats.

Le jury tient à souligner que lorsque les réponses sont données dans l’énoncé, il est encore plus intransigeant sur la qualité des justifications fournies. Il est beaucoup plus rentable de prendre le temps sur une question en justifiant proprement, que de tenter de répondre à toutes les questions en passant à côté des justifications. De même, lorsque l’énoncé attend un commentaire, il ne faut surtout pas se satisfaire d’une paraphrase, il faut au contraire faire le lien avec des lois physiques, et des notions à explicitement citer. Sur certaines copies, il y a un réel déséquilibre entre la quantité de feuilles produites et la note finale, totalement justifié par le fait que les candidats font rarement preuve d’une rigueur scientifique suffisante.

Le jury a été enthousiasmé à la lecture de quelques copies exceptionnelles qui sont l’œuvre de candidats très bien préparés, connaissant très bien leurs cours, sachant raisonner en physiciens, capables d’une véritable analyse scientifique, livrant des commentaires d’une pertinence remarquable, s’exprimant avec concision, clarté et efficacité. Il est donc d’autant plus désolé de compter autant de copies ne présentant quasiment aucune de ces qualités, pas même la plus fondamentale pour aborder une épreuve de concours : la maîtrise du cours.

Les conseils donnés dans les rapports des années précédentes sont bien sûr encore valables et plutôt que de les rappeler ici nous renvoyons les futurs candidats à leurs lectures, et préférons formuler ici quelques recommandations pour les nouveaux types d’évaluation, en particulier les questions d’analyse documentaire :

- toujours bien référencer un argument trouvé dans un document ;
- avoir un raisonnement rigoureux et totalement explicite en détaillant toutes les étapes du raisonnement.

La proportion de ces questions dans les sujets ne faisant que grandir, une stratégie d’évitement est clairement de plus en plus pénalisante. Au contraire, si les candidats montrent qu’ils font l’effort de détailler et de clarifier leur argumentation, ces questions peuvent être très valorisantes.

On ne peut enfin par ailleurs que conseiller aux candidats de toujours formuler des commentaires pertinents, même quand ils ne sont pas demandés explicitement. Le jury valorise systématiquement

ces initiatives. Nous espérons que ces quelques conseils seront profitables aux futurs candidats à cette épreuve qui suit naturellement dans sa forme les évolutions des programmes de CPGE et de leurs modalités d'évaluation.